

Das Limitações Histórico-Conceituais das Apresentações do Conteúdo de Entropia nos Livros de Física do Ensino Superior a uma Proposta de Ensino Fundamentada em Fatos Históricos

Jefferson Adriany Ribeiro da Cunha
Luiz Gonzaga Roversi Genovese
Wellington Pereira de Queiros

RESUMO

Por meio da Análise de Conteúdo, realizamos uma investigação da proposta didática existente em vários textos de Física do Ensino Superior sobre a introdução do conceito Entropia. Nesta análise e catalogação dos textos destacamos duas dimensões de abordagem didática e metodológica, utilizadas pelos textos para a apresentação de entropia, que são: Estratégia das definições e Estratégia da contextualização. Por meio de vários referenciais teóricos da área de História e Filosofia da Ciência verificamos que os conceitos físicos também podem ser trabalhados por meio de uma estratégia didática que leva em conta como historicamente este conceito foi desenvolvido, observando as controvérsias e discussões de um momento histórico que levou ao estabelecimento deste conceito. A esta abordagem didática demos o nome: Estratégia fundamentada em fatos históricos. Verificamos que nenhum dos textos consagrados no Ensino Superior de Física utilizam da última estratégia para trabalhar o conceito entropia e observamos, em trabalhos atuais da área de ensino de física, que a grande dificuldade em se compreender este conceito estava ligado diretamente a forma como é tratado nos textos tradicionais. Observando o exposto, aplicamos a Estratégia fundamentada em fatos históricos para o conceito de entropia e montamos uma nova estratégia didática para este conceito tentando solucionar os problemas envolvidos atualmente na compreensão deste fenômeno. Mostramos como surge a definição de entropia utilizando os trabalhos de Carnot, Joule, Kelvin e Clausius. Apresentamos argumentos razoáveis para a insustentabilidade das estratégias adotadas pelos livros didáticos tradicionais ao apresentarem este conceito ignorando elementos históricos indissociáveis ao conceito de entropia.

Palavras-chave: Estratégia Didática. História e Filosofia da Ciência. Segunda lei da Termodinâmica. Entropia.

Jefferson Adriany Ribeiro da Cunha – Doutor em Física pela Universidade de Brasília (UnB). Atualmente é professor Associado do Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás IF/UFG. Endereço: Universidade Federal de Goiás, Instituto de Física Av. Esperança, s/nº, Campus Samambaia – 74.690-900 – Goiânia, GO. E-mail: adriany@ufg.br

Luiz Gonzaga Roversi Genovese – Doutor em Educação para a Ciência pela Universidade Estadual Paulista (Unesp-Bauru). Atualmente é professor Associado do Instituto de Física da Universidade Federal de Goiás IF/UFG. Endereço: Universidade Federal de Goiás, Instituto de Física, Av. Esperança, s/nº, Campus Samambaia – 74.690-900 – Goiânia, GO. E-mail: lgenovese@ufg.br

Wellington Pereira de Queiros – Doutor em Educação para a Ciência pela Universidade Estadual Paulista (Unesp-Bauru). Atualmente é professor Adjunto do Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul INFI/UFMS. Endereço para Correspondência: Cidade Universitária, Caixa Postal 549. CEP 79070-900, Campo Grande-MS. E-mail: wellington_fis@yahoo.com.

Recebido para publicação em 06 fev. 2018. Aceito, após revisão, em 19 abr. 2018.

Acta Scientiae	Canoas	v.20	n.2	p.117-134	mar./abr. 2018
----------------	--------	------	-----	-----------	----------------

From the Historical-Conceptual Limitations of the Presentation of the Entropy in the Books of Physics of Higher Education to a Proposal of Education Grounded in Historical Facts

ABSTRACT

Through the Content Analysis we carried out an investigation of the didactic proposal existing in several texts of Higher Education Physics on the introduction of the Entropy concept. In this analysis and cataloging of the texts we highlight two dimensions of didactic and methodological approach, used by the texts for the presentation of entropy, which are: Strategy of definitions and Strategy of contextualization. Through several theoretical references in the area of History and Philosophy of Science we verified that the physical concepts can also be worked through a didactic strategy that takes into account how historically this concept was developed, observing the controversies and discussions of a historical moment that led to the establishment of this concept. To this didactic approach we gave the name: Strategy based on historical facts. We verified that none of the texts consecrated in Higher Education of Physics use the last strategy to work on the concept entropy and we observed in current works of the area of physics teaching that the great difficulty in understanding this concept was directly related to the way it is treated in traditional texts. Taking into account the above, we apply the Strategy based on historical facts to the concept of entropy and we set up a new didactic strategy for this concept trying to solve the problems currently involved in understanding this phenomenon. We show how the entropy definition appears using the works of Carnot, Joule, Kelvin and Clausius. We present reasonable arguments for the unsustainability of strategies adopted by traditional textbooks when presenting this concept ignoring historical elements inseparable from the concept of entropy.

Keywords: Teaching Strategy. History and Philosophy of Science. Second Law of Thermodynamics. Entropy.

INTRODUÇÃO

Uma discussão extremamente pertinente para os professores de Física e Química, no ensino médio ou superior, trata-se da abordagem procedimental didática e conceitual da Segunda Lei da Termodinâmica do ponto de vista da entropia. Analisando o aspecto conceitual, na leitura de Dias (2007), vemos que a dificuldade em se compreender esse conceito tem origem nos primórdios de sua fundação por Rudolf Clausius. Durante o período de assentamento deste conceito e sua interpretação, William Thomson sempre questionava Clausius acerca da dinâmica entre calor e trabalho no ciclo de Carnot, o que de certa forma catalisou o processo de formulação do conceito de entropia em um ambiente de grandes controvérsias, por Clausius.

As dificuldades em se compreender este conceito são variadas. Em Styer (2000) o autor relata que entre os conceitos clássicos de física como aceleração, energia, campo elétrico e tempo o mais difícil de se entender é a entropia. Para ilustrar o quão complexo é este tema, menciona a famosa frase de John von Newmann a Claude Shannon “Ninguém realmente sabe o que é entropia”. Continua citando argumentos de estudantes relatando que os mesmo conseguem resolver os problemas envolvendo entropia mas não entendem o

material. Styer (2000) questiona a analogia feita entre entropia e desordem como estratégia didática para o ensino deste conceito, listando inúmeros exemplos desta inconsistência.

No trabalho de Lambert (2002), é relatada a dificuldade dos estudantes universitários em assimilar o conceito de entropia. Este lista vários livros de química com figuras bonitas tentando relacionar entropia com desordem, bagunça ou aleatoriedade. É questionada a eficácia destas analogias e mostrado que estes argumentos mais causam confusão que ajudam no entendimento deste conceito. Lambert (2002) mostra que a origem desta confusão conceitual parte da escolha de Boltzmann para sua definição probabilística de entropia associando uma maior entropia a um gás a alta temperatura, com maior agitação molecular, e assim com maior desordem. Posteriormente a Boltzmann, Helmholtz em 1882 também utilizou o termo “desordem” para este conceito e também Gibbs, definindo entropia do ponto de vista estatístico usou o termo “mistura”.

Um ponto importante observado por Oliveira e Dechoum (2003) é a grande abrangência do termo entropia que, após o sucesso dos modelos físicos na explicação dos processos térmicos e outros sistemas, ganhou muitas interpretações no campo da biologia, economia e até ciências sociais. Com a dificuldade em se definir precisamente este conceito, surge um problema de inadequação deste termo observando que se trata de um conceito multifacetado. Diante deste cenário a compreensão e o ensino de entropia nas aulas de química e física ficam mais e mais complicados para os estudantes.

Do ponto de vista do material didático, existem problemas sérios no processo de ensino do conceito de entropia. Historicamente, na análise de Borges (1999), os primeiros artigos que propõem a construção do corpo teórico da termodinâmica foram concebidos em uma perspectiva axiomática, baseada em postulados, nos trabalhos de Caratheódory e Tisza. Esta abordagem axiomática foi preservada em detrimento de um texto mais heurístico, fundamentado em resultados de experimentos, por Callen (1985) que é um livro didaticamente mais moderno que se tornou referência de outros textos no ensino superior e também para autores do ensino médio. Nesta abordagem, o conceito de entropia é postulado, e como seu nome não tem nenhuma relação com sua propriedade e função, a compreensão deste conceito se torna complexa.

Analisando vários textos, no estudo da Segunda Lei da Termodinâmica, deparamos com o desafio de introduzir de forma palatável o conceito de entropia. Vários autores introduzem este assunto por meio de uma simples definição (Halliday & Hestnick, 1985; Tipler, 2009) ou por meio de argumentações que decorrem do conhecimento das implicações do conceito de entropia (Young & Freedman, 2008), relacionando entropia com desordem ou com a flecha do tempo. Após muita argumentação em uma estratégia didática que parte de uma definição ou contextualização os estudantes se sentem mais confortáveis na assimilação de tal conhecimento e partem para sua aplicação em várias situações propostas nos livros. Ao término de uma série de exercícios e problemas, os estudantes ficarão mais familiarizados com este conceito e entenderão alguns desdobramentos a respeito do que foi aprendido. Esta estrutura é muito confortável para estudantes moderadamente questionadores. Para um grupo diferenciado, que não se satisfaz com poucas explicações, sempre chegarão a um questionamento mais elaborado: Afinal

o que é realmente entropia? Como surge a definição de Entropia? Como estabelecemos a conexão entre entropia e a flecha do tempo? Por que afinal entropia está relacionada à desordem de um sistema termodinâmico? Para estes questionamentos, apenas as argumentações tradicionais, baseadas em exemplos não bastam. O que está em jogo é o conhecimento sobre a origem e a natureza da definição de entropia e os desdobramentos deste conceito em outras conexões e em uma análise microscópica e estatística. Estes questionamentos, fundamentais e extremamente pertinentes, não são respondidos nos manuais tradicionais. A transposição didática focada na definição pura e simples ou contextualização e problematização, utilizando a analogia com desordem, foi feita em detrimento desta importante passagem histórica, comprometendo um entendimento mais profundo e claro a respeito dos fundamentos do que é realmente a entropia.

Diante deste cenário colocamos nosso problema de pesquisa: como está estruturado o conceito de entropia nos livros de Física do ensino superior e qual abordagem metodológica alternativa pode ser proposta para superar as dificuldades no ensino deste conceito?

No intuito de responder a primeira parte da questão de pesquisa analisamos os livros didáticos de Física mais utilizados nos cursos de Física e áreas afins no Brasil. Com relação a segunda parte, propomos uma abordagem alternativa no presente trabalho, que é a utilização da História e Filosofia da Ciência (HFC) na construção do conceito de entropia. Apresentaremos nas próximas seções que a introdução deste importante conceito deve ser por meio da releitura e discussão de fatos históricos, em oposição às estratégias de transposição didática utilizadas nos livros textos tradicionais que fazem uso de contextualizações ou postulações deste conceito.

A transposição didática que se utiliza da estratégia do levantamento de fatos históricos pode ser utilizada na introdução de vários conceitos na física: quantidade de calor, teoria da relatividade restrita, teoria das cores de Newton entre outros (Dias, 2001; Nussenzeig, 1999; Peduzzi, 2001; Silva & Martins, 2003). Com esta estratégia ganhamos legitimidade na argumentação, introduzimos significado ao conceito apresentado e sustentação epistemológica ao argumento (Matthews, 1995; Dias, 2001), pois se baseia em acontecimentos históricos e não em pura apresentação de definições, contextualizações ou situações-problema idealizadas, que fogem ao contexto original ao qual a teoria foi construída.

Para esclarecer os pontos colocados sobre as possíveis estratégias na apresentação do conceito entropia, a seguir apresentamos como surgiram as categorias em que os textos são classificados e os critérios para a escolha dos livros utilizados neste trabalho. Posteriormente apresentamos as estratégias didáticas encontradas das análises dos livros e como o conceito de entropia está sendo apresentado em cada uma. Embasado na análise de episódios históricos sobre HFC, apresentamos a estratégia didática defendida no presente texto para se introduzir o conceito de entropia e posteriormente as conclusões do trabalho.

METODOLOGIA DE PESQUISA

Para responder as questões da pesquisa, sobre a análise do capítulo referente ao conceito de entropia nos livros didáticos de física do ensino superior, foi utilizada a metodologia da análise do conteúdo de Bardin (1977). A adoção desta metodologia se deve a sua ênfase em escrutinar os fenômenos simbólicos, como os livros didáticos, de forma empírica, contextualizada e crítica no que se refere à construção do plano de investigação elaborado (Krippendorff, 1990).

Utilizando a análise de conteúdo, organizamos os dados conforme sugere Bardin (1977), em três momentos: 1) uma pré-análise, que consiste na fase de organização do material; 2) a exploração do material, processo de codificação dos dados brutos de acordo com seus elementos comuns; e 3) o tratamento dos resultados, que corresponde à inferência e à interpretação, por meio de diagramas, tabelas, e gráficos.

Primeiramente selecionamos os livros didáticos de física do ensino superior (Halliday & Hesnick, 1985; Young & Freedman, 2008; Tipler, 2009; Serway & Jewett, 2012; Keller, Gettys & Skove, 1999; Chaves, 2007; Alonso & Finn, 1999; Callen, 1985; Nussenzweig, 1999) que constituem o *corpus* de análise. O critério de seleção destes livros foi a grande utilização dos mesmos nos cursos de ciências exatas nas universidades brasileiras. Inicialmente realizamos uma leitura flutuante dos capítulos que abordam a Segunda Lei da Termodinâmica analisando as estratégias didáticas referentes ao conteúdo de entropia. Nesta pré-análise percebemos algumas estratégias didáticas comuns nos livros didáticos analisados na abordagem deste conceito. No segundo momento, realizamos a análise dos capítulos sobre o conteúdo de entropia a partir de uma leitura mais atenta, na qual foi realizado o recorte e agregação do material a fim de caracterizá-lo segundo as especificidades nele presentes (Bardin, 1977), obviamente, segunda a orientação de pesquisa.

Assim, analisamos as sequências didáticas que culminou no delineamento de duas dimensões: 1) Estratégia das definições, na qual a sequência didática é pautada pela apresentação de um princípio ou conceito geral de onde são deduzidas novas proposições; 2) Estratégia da contextualização, por sua vez, indica que a sequência didática é centrada na apresentação de um contexto problemático, seja científico, tecnológico ou social, do qual e sobre o qual são erigidos conceitos e teorias explicativas. Para completar nossa investigação, ou seja, ir além das inferências feitas sobre o *corpus* estudado por meio das dimensões apresentadas anteriormente, propomos uma terceira dimensão: 3) Estratégia fundamentada em fatos históricos, que é a dimensão que não aparece nos livros para se introduzir entropia, mas surge da investigação da literatura e também de forma parca em alguns textos sobre outros conceitos (Dias, 2001; Peduzzi, 2001; Silva & Martins, 2003; Nussenzweig, 1999). Após o estabelecimento dessas categorias, no terceiro momento organizamos e verificamos a ocorrência das mesmas por meio dos fragmentos de texto do conteúdo de entropia que corroboram e possibilitam a interpretação de acordo com as categorias montadas. E mais, apresentamos uma alternativa de sequência didática do conteúdo de entropia, por meio da Estratégia fundamentada em fatos históricos,

diferente das estratégias didáticas apresentadas pelos livros didáticos analisados no presente trabalho.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio da análise de conteúdo descrita na seção anterior emergiram duas dimensões empíricas para as estratégias didáticas de transposição do conceito de entropia nos livros analisados: 1) Estratégia das definições e 2) Estratégia da contextualização. Na primeira, a entropia é definida, são discutidas as possibilidades matemáticas e fenomenológicas para esta definição, e este conceito se assenta na memória dos estudantes por meio da de atividades propostas. Na segunda dimensão este conceito é discutido dentro de um contexto, posteriormente é definido e por fim exemplificado e praticado nos problemas sobre este tema. Abaixo apresentamos estas duas estratégias encontradas nos livros e como estão sendo utilizadas.

Por meio da imersão na literatura sobre HFC e os atuais trabalhos sobre o uso da História da Ciência no ensino de Física (Cardwell, 1971; Dias, 2001; Peduzzi, 2001; Silva & Martins, 2003; Schurmann, 1945; Papp, 1945) apresentamos ao final desta seção uma terceira estratégia metodológica: Estratégia fundamentada em fatos históricos. Posteriormente esta estratégia será aplicada ao conceito de entropia e poderemos ver os ganhos desta abordagem.

Estratégia das Definições

Nesta estratégia o conceito a ser introduzido é inicialmente definido, postulando determinada propriedade e comportamento do fenômeno observado na natureza. Posteriormente a esta definição, partimos para as aplicações e entendimento do significado físico de tal postulado. A compreensão dos conceitos, por meio desta estratégia, surge da prática do uso do mesmo. Alguns autores como (Halliday & Hesnick, 1985; Callen, 1985; Tipler, 2009) utilizam da estratégia das definições para apresentar o conceito de entropia. Na introdução do tema, após a exposição do que será tratado, a definição de variação de entropia é colocada:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} \quad (1)$$

As condições para se utilizar esta definição são apresentadas e os estudantes são convidados a acompanhar a aplicação deste novo conceito ao sistema do gás ideal e aos demais sistemas. Nesta incursão didática os estudantes compreendem o conceito de entropia da exaustiva repetição de problemas e memorização de suas propriedades. Nesta lista, apenas as referências

Chaves (2007) e Nussenzeig (1999) definem entropia a partir do ciclo de Carnot. As demais citações apenas partem da definição, Eq. (1), sem recorrerem ao ciclo de

máxima eficiência proposto por Carnot. A Estratégia das definições de conceitos pode ser compreendida por meio do fluxograma apresentado na Figura 1.

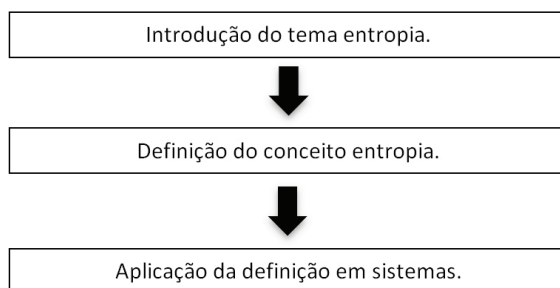


Figura 1. Fluxograma da Estratégia das Definições.

Esta dimensão metodológica tem origem em uma abordagem axiomática, baseada em postulados, nos trabalhos de Caratheódory e Tisza (Borges, 1999). Nesta proposta o conceito é apresentado desconsiderando o contexto histórico das ideias e problemas enfrentados pelos estudiosos naquela época, que são importantes para a compreensão deste conceito. O que, por sua vez, passa ideias equivocadas sobre o processo de construção do conceito de entropia, tendo em vista, que o mesmo envolveu problemas práticos, por exemplo. E, deles foram sendo pensados modelos teóricos e, não ao contrário, como é destacado por esse tipo de estratégia.

Estratégia da Contextualização

Nesta estratégia os conceitos surgem ao apresentarmos um problema a ser resolvido ou na introdução de um determinado contexto descrito, em seguida solucionamos o problema apresentado definindo uma nova grandeza ou concluímos a argumentação com a introdução de um novo conceito. Esta estratégia é muito confortável, pois os conceitos são de certa forma construídos juntamente com os estudantes, por meio da resolução de um problema ou por meio da argumentação ponderada que permite a elaboração do conceito.

Vários textos (Young & Freedman, 2008; Serway & Jewett, 2012; Chaves, 2007; Alonso & Finn, 1999; Nussenzevig, 1999), fazem uso desta estratégia didática da contextualização para chegar ao conceito de entropia. Estes textos utilizam uma série de argumentações, que muitas vezes são consequências do conceito de entropia, introduzindo termos como: *o universo tende a desordem; como medir o nível de desordem de um sistema?; a entropia indica o sentido da flecha do tempo; a entropia mede a desordem de um sistema.* Após esta bateria de argumentações, problematizações e contextualizações, finalmente passamos para a definição da entropia e posteriormente às aplicações da mesma em determinados sistemas e verificações se as propriedades e questões são realmente provadas e respondidas por esta definição. Vários detalhes, se bem explorados, nunca

serão plenamente respondidos seguindo esta estratégia de transposição do conceito de entropia, sempre encontraremos algumas propriedades não muito bem compreendidas e que precedem ou sucedem outras, uma situação semelhante a demonstração de um teorema que se utiliza de seus corolários. A estratégia didática da contextualização dos conceitos pode ser organizada como apresentado na Figura 2.

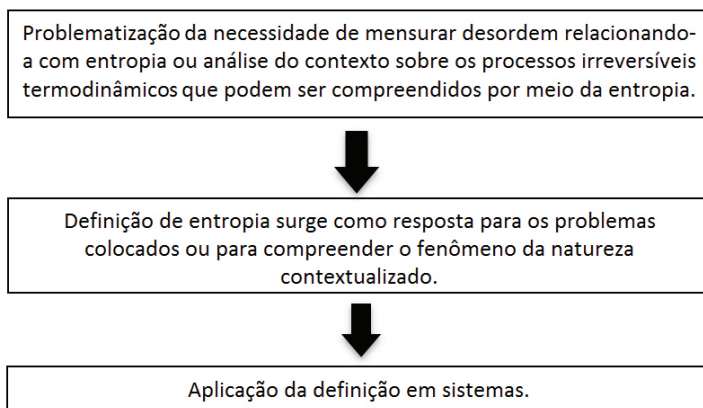


Figura 2. Fluxograma da Estratégia da Contextualização.

Um problema grave nesta abordagem, é observado nos textos (Young & Freedman, 2008; Serway & Jewett, 2012) quando na contextualização introduzem a relação entre entropia e desordem. Estes textos sempre fazem esta relação utilizando o salto da termodinâmica na discussão da segunda lei para o modelo cinético-molecular. Vários autores como Lambert (2002) e Styer (2000) argumentam que esta contextualização mais confunde os estudantes que os ajudam a compreender de maneira mais profunda o que é entropia, uma vez que antecipa uma discussão que somente faz sentido no âmbito da Física Estatística, com a definição dos microestados e macroestados.

Apesar dessa proposta sinalizar que o cientista não elabora suas construções teóricas como um mágico tira um coelho da cartola, ou seja, sem relação com o contexto teórico e tecnológico no qual está imerso, o mesmo ainda não indica em que bases o novo conceito se estabelece e se sobrepõe aos anterior. Pode-se ainda afirmar que nos livros investigados há, apesar de levar em consideração o contexto científico e tecnológico da época em que se dá a elaboração dos conceitos, uma mescla das correntes de pensamento, inclusive de momentos históricos distintos, o que deve ser evitado.

Estratégia Fundamentada em Fatos Históricos

A Estratégia fundamentada em fatos históricos é importante pois possibilita a montagem do cenário de debate intelectual e socioeconômico de uma época onde se deu o confronto de ideias a respeito dos problemas que motivaram a construção de

uma determinada teoria ou conceito (Dias, 2001; Peduzzi, 2001; Silva & Martins, 2003). Os problemas experimentais, limites de validade da teoria e sua aplicabilidade são melhores compreendidos por meio desta retrospectiva histórica. As questões de ordem epistemológicas são naturalmente discutidas pois são indissociáveis dos relatos de construção das teorias. No caso do conceito de entropia, temos algumas questões epistemológicas profundas, que somente são compreendidas por meio desta estratégia: o surgimento do conceito de entropia por meio do ciclo de Carnot (Papp, 1945; Schurmann, 1945; Cardwell, 1971; Quadros, 1996), o fato de Carnot ter sustentado sua teoria em uma concepção inverídica da materialidade do calor, sendo que tal sustentação não invalidou suas análises (Papp, 1945; Schurmann, 1945; Cardwell, 1971; Quadros, 1996) e também a interpretação do conceito de entropia como medida da degradação da energia útil (Styer, 2000; Lambert, 2002).

Nesta metodologia o conceito de entropia pode ser introduzido utilizando a motivação da resolução de problemas. Mas nesta abordagem, o problema pode ser melhor colocado pois nos baseamos nos fatos históricos que propiciaram o seu surgimento. A definição de entropia surge em decorrência da resolução de um problema, resgatado no passado, e suas propriedades são apresentadas posteriormente à sua definição. A atenção do leitor não é conquistada discutindo as consequências do conceito de entropia, para assim defini-la, mas na discussão dos aspectos históricos intrigantes que propiciaram a introdução do problema em questão, a resolução deste problema e a definição de entropia.

A importância de uma retrospectiva histórica, como estratégia didática na apresentação de uma lei da natureza, é discutido também por Passos (2009). Neste exemplo, o autor defende que uma retrospectiva histórica nos propicia um entendimento apropriado sobre o princípio da equivalência mecânica do calor, compreendendo este princípio de forma mais ampla e não somente como uma determinação do fator de conversão entre trabalho e calor. Na Figura 3 mostramos um fluxograma da Estratégia fundamentada em fatos históricos que poderá ser aplicada ao conceito de entropia.

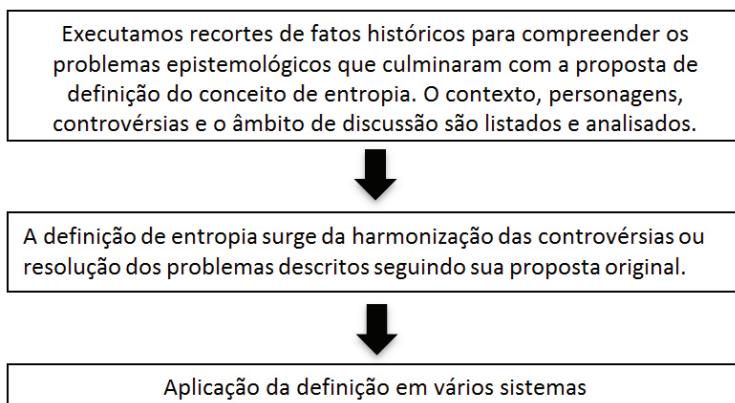


Figura 3. Fluxograma da Estratégia Fundamentada em Fatos Históricos.

O CONCEITO DE ENTROPIA POR MEIO DA ESTRATÉGIA FUNDAMENTADA EM FATOS HISTÓRICOS

Nesta seção vamos aplicar a categoria Estratégia fundamentada em fatos históricos, proposta e apresentada anteriormente, na introdução do conceito de entropia. Mostraremos que esta estratégia é alicerçada em fatos históricos no constructo teórico deste conceito. A aplicação desta estratégia é fruto de alguns referenciais teóricos importantes da área de HFC sobre termodinâmica que foram usados neste trabalho (Cardwell, 1971; Dias, 2001; Lambert, 2002; Martins, 2001; Thomson, 1849; Papp, 1945; Silva & Martins, 2003; Styer, 2000; Schurmann, 1945).

O ciclo de Carnot

Uma máquina perfeita, trabalhando em ciclos convertendo calor completamente em trabalho seria um artefato maravilhoso. Um navio poderia navegar pelos mares apenas utilizando o calor das águas, os carros poderiam retirar calor da radiação solar e convertê-la completamente em movimento indefinidamente. Por que estas máquinas não são concebíveis? Qual o limite de eficiência para uma dada máquina térmica? Estas são algumas questões que são melhor compreendidas ao estudarmos a segunda lei da termodinâmica.

O francês Nicolas Léonard Sadi Carnot se dedicou ao estudo do funcionamento das máquinas térmicas e publicou suas análises em seu único trabalho intitulado *Reflexões Sobre a Força Motriz do Fogo*. A grande preocupação de Carnot estava no entendimento do funcionamento teórico das máquinas térmicas e a importância que tal mecanismo representava para a sociedade francesa e inglesa do século XIX. Por serem muito empregados na extração de minério e outros setores, as melhorias destes artefatos implicariam diretamente na economia e possibilitariam um avanço para a sociedade que os detinha.

Partindo da concepção de um fluido ígneo, sugerido por Lavoisier para a natureza do calor, historicamente conhecido como calórico (Papp, 1945; Schurmann, 1945; Cardwell, 1971), Carnot introduz o princípio de funcionamento de uma máquina térmica que consiste na transferência de calórico de uma fonte quente para uma fonte fria. O funcionamento desta máquina, Máquina de Carnot, pode ser compreendida por meio da analogia com uma roda d'água que gera trabalho através de um fluxo de água (Cardwell, 1971; Nóbrega, 2009; Quadros, 1996). Nesta analogia o fluxo de calórico deveria escoar da diferença de temperatura, $\Delta T = T_Q - T_F$, do reservatório quente à temperatura T_Q para o reservatório frio com temperatura T_F , de forma semelhante à água escoando em uma queda por meio de uma diferença de altura $\Delta H = H_2 - H_1$. Como nos níveis da queda d'água temos valores diferentes de energia potencial que podem ser utilizados para girar uma roda d'água produzindo trabalho, na diferença de temperatura o calórico também deveria ter uma *potência motriz* maior na temperatura T_Q se comparado à temperatura

T_F e nesta queda de temperatura gerar um trabalho útil W . Como na queda d'água os elementos importantes são o volume de água e a altura da queda, no caso do calórico o que determina o trabalho são a quantidade de calórico e a diferença de temperatura entre as fontes quente e fria, $T_Q - T_F$.

Eficiência do Ciclo de Carnot

Nesta subseção apresentamos o modelo e a metodologia conhecida nos livros atuais para a obtenção da eficiência do ciclo de Carnot. Na Figura 4 mostramos as quatro etapas que um gás, máquina térmica, ideal é submetido no ciclo de Carnot para produzir trabalho. No experimento que gera o diagrama do ciclo da Figura 4 temos um gás confinado em um cilindro com um pistão móvel que tem sobre este um peso variável. As paredes do cilindro são adiabáticas e o gás pode trocar calor com um reservatório térmico colocado sob o mesmo. Desta forma o gás pode ser comprimido ou expandido, de forma adiabática, aumentando ou diminuindo lentamente o peso sobre o pistão. E pode também ser expandido ou comprimido, isotermicamente, colocando ou retirando calor por meio do reservatório térmico.

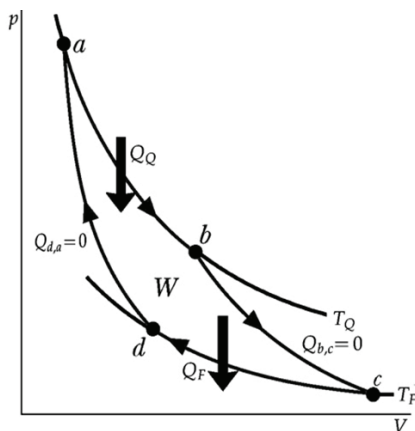


Figura 4. O Ciclo de Carnot.

Neste ciclo consideramos que os processos são ideais e devem ser totalmente reversíveis sendo que o calor flui da fonte quente ou fria, para o gás, de forma isotérmica. O calor do reservatório quente Q_Q e do reservatório frio Q_F não altera a energia interna do sistema, $\Delta U = 0$, em nenhuma etapa, pois isso acarretaria perdas, uma vez que calor convertido em energia interna não retorna ao reservatório. Assim, nas etapas $a \rightarrow b$ e $c \rightarrow d$ temos apenas conversão de calor em trabalho e trabalho em calor. As etapas $b \rightarrow c$ e $d \rightarrow a$ não envolvem trocas de calor e por isso não existe calor convertido em outras formas de energia neste ciclo.

Os quatro processos termodinâmicos que um gás ideal é submetido no ciclo de Carnot são descrito abaixo:

1ª Etapa – $(p_a, V_a, T_Q) Q_Q > 0, W_{a,b} > 0(p_b, V_b, T_Q)$: neste processo $\Delta U = 0$ e o calor, em módulo, vale:

$$Q_Q = nRT_Q \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right) \quad (2)$$

2ª Etapa – $(p_b, V_b, T_Q) Q_{b,c} = 0, W_{b,c} > 0(p_c, V_c, T_F)$: nesta etapa retiramos um pouco de peso sobre o pistão de tal forma que o gás possa realizar uma expansão adiabática.

3ª Etapa – $(p_c, V_c, T_F) Q_F < 0, W_{c,d} < 0(p_d, V_d, T_F)$: retiramos uma quantidade de calor Q_F isotermicamente por meio da introdução gradativa de peso que está sobre o pistão que confina o gás. O módulo do calor vale:

$$Q_F = nRT_F \ln\left(\frac{V_c}{V_d}\right) \quad (3)$$

4ª Etapa – $(p_d, V_d, T_F) Q_{d,a} = 0, W_{d,a} < 0(p_a, V_a, T_Q)$: introduzimos mais peso sobre o pistão de forma que sua temperatura retorne a T_Q , em um processo adiabático. Fechando o ciclo, encontramos que:

$$\Delta U = Q_Q - Q_F - W = 0 \quad (4)$$

Utilizando a Eq. (4), a eficiência do ciclo de Carnot pode ser calculada como,

$$e = \frac{W}{Q_Q} = 1 - \frac{Q_F}{Q_Q} = 1 - \frac{T_F \ln\left(\frac{V_c}{V_d}\right)}{T_Q \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right)} \quad (5)$$

Lembrando que as relações entre temperatura e volume nos processo adiabáticos são escritos como: $T_Q V_b^{\gamma-1} = T_F V_c^{\gamma-1}$; $T_Q V_a^{\gamma-1} = T_F V_d^{\gamma-1}$, podemos escrever a Eq. (5), eficiência de um ciclo ideal de Carnot, como:

$$e_{Carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \quad (6)$$

O presente resultado, Eq. (6), mostra que a eficiência de uma máquina de Carnot depende apenas das temperaturas dos dois reservatórios. Caso esta diferença seja grande, maior será a eficiência.

A Entropia de Clausius

Na formulação da primeira e segunda lei da termodinâmica, temos associados a esta grande implementação humana grandes personalidades, tais como: Julius Robert Mayer, James Prescott Joule, Hermann von Helmholtz, Benjamin Thompson (Conde Rumford), William Thomson (Lorde Kelvin), Sadi Carnot e Rudolf Clausius (Cardwell, 1971; Dias, 2001; Lambert, 2002; Martins, 2001; Thomson, 1849; Papp, 1945; Silva & Martins, 2003; Styer, 2000; Schurmann, 1945). Mayer e Joule trabalharam na lei da conservação da energia admitindo que o calor é também uma forma de energia. Joule realizou vários experimentos na investigação do equivalente mecânico do calor e um de seus experimentos mais famosos era a geração de calor por fricção de pás em um líquido. No *Princípio de Joule* (Dias, 2007) o trabalho é gerado por uma máquina térmica utilizando parte do calor recebido da fonte quente. Como descrito por Thomson (1849) as descobertas feitas por Joule se baseiam na geração de calor por meio da fricção dos fluidos em movimento.

Carnot se dedicou ao entendimento do princípio de funcionamento das máquinas térmicas motivado pela importância destas na economia francesa. No *Princípio de Carnot* (Dias, 2007) o trabalho produzido em uma máquina térmica é fruto da queda de *calórico* da fonte quente para a fonte fria. Como argumentado por Thomson (1849), para Carnot calor é uma substância que não pode ser gerado por algum agente físico.

O Problema da Adoção da Materialidade do Calor

Ao analisarmos os desdobramentos dos fatos históricos no desenvolvimento dos trabalhos de Joule e Carnot (Nóbrega, 2009; Quadros, 1996; Schurmann, 1945; Cardwell, 1971; Papp, 1945; Thomson, 1849), surge um cenário controverso. O trabalho de Carnot é alicerçado na concepção da natureza do calor como *calórico*. Como citado anteriormente, Carnot sustentava a argumentação que uma quantidade de *calórico* flui em uma diferença de temperatura $T_Q - T_F$ realizando um trabalho mecânico W , argumentação esta que aparece em mão oposta à visão de Joule sobre a natureza do calor. Confrontando os fatos históricos, temos um cenário com duas posições contrárias: *Princípio de Joule* e a produção de calor por meio da fricção dos fluidos ou *Princípio de Carnot* e a materialidade do calor conhecido como *calórico*.

Neste momento surge o problema em uma retrospectiva histórica, analisado por William Thomson, que será solucionado por Rudolf Clausius elucidando e conciliando as posições de Carnot e Joule, que expomos na próxima seção.

Definição do Conceito de Entropia

Baseado na argumentação matemática de Quadros (1996, p.69), descrevemos abaixo como chegar na razão Q/T utilizando o ciclo de Carnot e escrevendo o trabalho de uma máquina térmica seguindo os princípios de Carnot e Joule.

Analiseemos o funcionamento de uma máquina térmica de Carnot, do ponto de vista do *Princípio de Joule* utilizando o conceito de calor e do *Princípio de Carnot* por meio do calórico. O calor, que é a concepção aceita atualmente indicaremos, como sempre fizemos, pela letra Q e o fluido ígneo chamado calórico representaremos pela letra C , separando os dois conceitos.¹

Calor – Princípio de Joule: Considere uma máquina trabalhando entre uma fonte quente a uma temperatura T_Q e uma fonte fria à T_F . O trabalho gerado pela máquina, utilizando o *Princípio de Joule* será:

$$W = Q_Q - Q_F \quad (7)$$

Calórico – Princípio de Carnot: Como discutido anteriormente, Carnot associava o funcionamento de uma máquina térmica entre as fontes T_Q e T_F a uma queda d'água girando uma roda (Nóbrega, 2009). Na queda d'água o trabalho pode ser dado por $W = mgh_Q - mgh_F$. De forma análoga, se imaginarmos que existe uma quantidade de calórico C que flui de T_Q para T_F e que a energia é proporcional ao produto da temperatura pelo calórico, o trabalho fica escrito como:

$$W = CT_Q - CT_F \quad (8)$$

Com isso, na argumentação de Carnot, o trabalho é fruto da diferença da potência motriz do calórico em T_Q e T_F . Quando o calórico cai, perde potência motriz que é transferido em forma de trabalho.

Como o trabalho nas duas formulações está correto, podemos igualar Eq. (7) com Eq. (8) para encontrar o valor da grandeza C que sai de um corpo quente e chega a um corpo frio no *Princípio de Carnot*:

$$Q_Q - Q_F = CT_Q - CT_F \quad (9)$$

Para que a presente igualdade seja estabelecida, devemos impor que:

$$C = \frac{Q_Q}{T_Q} = \frac{Q_F}{T_F} \quad (10)$$

Por meio da Eq. (10), Clausius identifica o que Carnot chamava de calórico, como uma grandeza que batizou de entropia, que do grego significa transformação, e atribuiu a esta o símbolo S , $C = S$. Esta grandeza, no ciclo de Carnot, flui do reservatório quente para o frio em um processo reversível:

$$S = \frac{Q}{T} \quad (11)$$

¹ Nesta análise estamos considerando os dois pontos de vista da natureza do calor Q e C , para introduzirmos o conceito de entropia. Em momento algum temos a intenção de justificar a existência de um fluido material C .

Para processos infinitesimais:

$$\Delta S = \int \frac{dQ}{T} \quad (12)$$

Compreendendo a argumentação de Clausius: Para a máquina reversível de Carnot, em cada ciclo uma quantidade de entropia é retirada da fonte quente, Q_Q/T_Q e chega a fonte fria, Q_F/T_F ,

$$\Delta S = \frac{Q_Q}{T_Q} - \frac{Q_F}{T_F} = 0 \quad (13)$$

Desta forma, em um ciclo reversível, não temos nenhuma alteração na entropia. Quando calculamos a variação desta grandeza fechando o ciclo encontramos $\Delta S = 0$. S é sempre constante, e não existe degradação da energia útil. Clausius realizou vários cálculos, considerando processos irreversíveis e concluiu que nestes casos, $\Delta S > 0$, o que indica um aumento da entropia. Nestes casos o calor por unidade de temperatura não é constante o que indica que em determinados processos, para o caso irreversível, calor é convertido em outras formas de energia que não o trabalho e não são mais recuperadas e com isso dizemos que a energia térmica se degradou.

A entropia de Clausius consegue conciliar os princípios de Carnot e Joule ao introduzir o conceito de degradação de energia útil de um sistema, sendo que a interpretação da materialidade do calor não invalida o princípio de Carnot. No ciclo de Carnot parte da energia térmica é convertida em trabalho como assim indica Joule, mas nenhuma energia é degradada pois calor é convertido diretamente em trabalho e o restante segue para o reservatório frio. Para os processos irreversíveis parte da energia que não gera trabalho se degrada na termalização e este valor é medido pelo aumento da entropia do sistema.

Para compreendermos melhor o aumento da entropia de Clausius em um processo irreversível, considere dois corpos de massas e calores específicos iguais, mas com temperaturas diferentes e que estão em contato térmico. Ao longo do tempo um calor dQ flui do corpo 1 à temperatura T_1 para o corpo 2 à temperatura T_2 buscando o equilíbrio térmico. Neste processo, uma entropia dQ/T diminui no corpo 1 e uma entropia dQ/T aumenta no corpo 2. Como sugerido por Clausius, a entropia total será a soma das entropias em 1 com 2. Na termalização os dois corpos chegarão na mesma temperatura de equilíbrio T : $T_1 \rightarrow T$ e $T_2 \rightarrow T$, com $T = (T_1 + T_2)/2$. A entropia total será:

$$\Delta S_{1+2} = mc \int_{T_1}^T \frac{dT}{T} + mc \int_{T_2}^T \frac{dT}{T} = mc \ln \left(\frac{T^2}{T_1 T_2} \right) \quad (14)$$

Na Eq. (14), observando que o argumento da função \ln é maior que a unidade, vemos que a entropia total deve aumentar neste processo irreversível. Da análise dos processos reversíveis e irreversíveis sugere o enunciado de Clausius:

Entropia de Clausius:

- (a) Um processo é dito reversível se a entropia total for constante;
- (b) Um processo é dito irreversível se a entropia total aumentar.

Como os processos na natureza são irreversíveis, sendo a reversibilidade uma idealização, Clausius conclui também que a entropia do universo sempre está aumentando. Observando que a irreversibilidade está ligada à passagem do tempo temos então a conexão da flecha do tempo e o aumento de entropia no universo.

Podemos sintetizar a estratégia didática fundamentada em fatos históricos, para se introduzir o conceito de entropia, como ilustrado Figura 5.

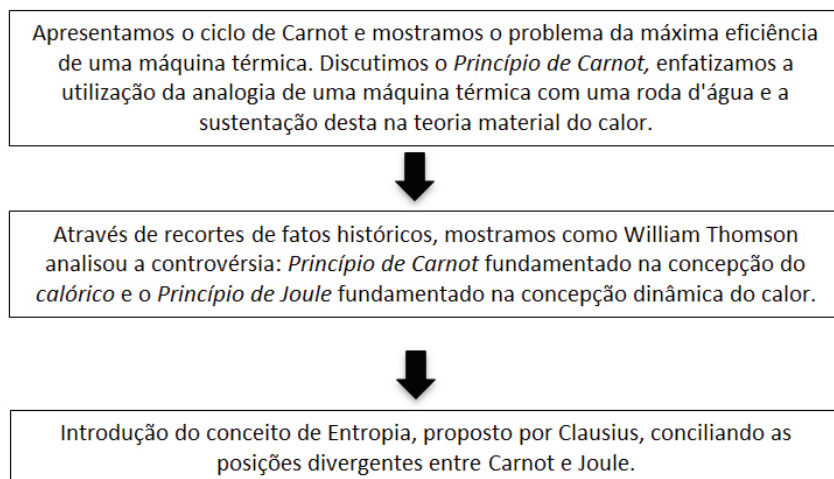


Figura 5. Fluxograma da sequência didática utilizada para se introduzir o conceito de entropia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente texto analisamos vários livros didáticos do ensino superior de Física e investigamos as várias possibilidades de se introduzir o conceito de entropia. Montamos duas categorias de análise e verificamos, por meio da leitura dos textos tradicionais, que o conceito de entropia pode ser introduzido por meio das seguintes estratégias didáticas: Estratégia das definições e Estratégia da contextualização. Em seguida, diante da problemática observada na literatura sobre a dificuldade de se compreender o conceito entropia por estas propostas, investigamos a possibilidade de se utilizar a História e Filosofia da Ciência para trabalhar este conceito. Desta investigação na literatura propusemos uma terceira categoria que nomeamos como: Estratégia fundamentada em fatos históricos, e apresentamos a estrutura desta categoria e aplicamos a mesma ao conceito entropia. Nesta aplicação, por meio do levantamento e análise de fatos históricos, mostramos como o conceito de entropia pode ser introduzido discutindo os relatos de William Thomson sobre o antagonismo existente entre a concepção da natureza do calor

de Carnot e Joule. Discutimos como Clausius conciliou estes dois princípios ao introduzir o conceito de Entropia. Mostramos que existe um ganho considerável ao utilizar uma abordagem histórica deste conhecimento, pois preservamos os aspectos epistemológicos, as controvérsias e dilemas sociais, científicos e econômicos de uma época.

A Estratégia do levantamento de episódios históricos, na introdução do conceito de entropia, apresentada no presente estudo permite uma compreensão mais profunda deste conceito e evitamos possíveis equívocos em seu entendimento, não se valendo das consequências ou desdobramentos deste conhecimento, que surgem em decorrência de sua definição, como encontramos nos livros analisados. Assim, a proposta descrita é uma alternativa que pode ser utilizada por autores de livros didáticos de Física do Ensino Superior e adaptada para livros didáticos do Ensino Médio.

REFERÊNCIAS

- Alonso, M., & Finn, E. J. (1999). *Física um Curso universitário*. Madrid: Pearson Educacion.
- Badin, L. (1977). *Análise de Conteúdo*. São Paulo: Edições 70, Lisboa.
- Borges, E. P. (1999, dezembro). Irreversibilidade, desordem e incerteza: três Visões da generalização do conceito de entropia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 21(4), 453-463.
- Cardwell, D. S. L. (1971). *From Watt to Clausius the rise of thermodynamics in the early industrial age*. New York: Cornell University Press Ithaca.
- Callen, H. B. (1985). *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics*. New York: 2nd ed. John Wiley & Sons.
- Chaves, A. (2007). *Física: Curso básico para estudantes de ciências físicas e engenharias*. Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso Editores.
- Dias, P. C. (2001, junho). A (im) pertinência da História ao aprendizado da Física (um estudo de caso). *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 23(2), 226-235.
- Dias, P. M. C. (2007, dezembro). A procura do trabalho perdido. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 29(4), 493-498.
- Halliday, D., & Resnick, R. (1985). *Fundamentos de Física, Gravitação, Ondas e Termodinâmica*, 2. Rio de Janeiro: LTC Editora.
- Keller, F. J., Gettys W. E., & Skove, E. M. J. (1999). *Física*, 2. São Paulo: Makron Books.
- Krippendorff, K. (1990). *Metodologia de análise de conteúdo*. Barcelona: Editorial Paidós.
- Lambert, F. L. (2002, fevereiro). Disorder-A cracked crutch for supporting entropy discussions. *Journal of Chemical Education*, Los Angeles, 79(2), 187-192.
- Martins, R. A. (2001, março). Como não escrever sobre história da física: um manifesto historiográfico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 23(1), 113-129.
- Matthews, M. R. (1995, dezembro). História, filosofia e ensino de ciências: a tendência atual de reaproximação. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, 12(3), 164-214.

- Nóbrega, M. L. (2009). *Segunda lei da termodinâmica: os caminhos percorridos por William Thomson (82 f)*. Dissertação de mestrado, Ensino, Filosofia e História das Ciências, Universidade Federal da Bahia/ Universidade Estadual de Feira de Santana, Salvador, Bahia.
- Nussenzveig, H. M. (1999). *Curso de física básica. 2*. São Paulo: Editora Edgard Blücher.
- Oliveira, P. M. C. & Dechoum, K. (2003, dezembro). Facilitando a compreensão da Segunda lei da Termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 25(4), 359-363.
- Peduzzi, L. O. Q. (2001). Sobre a utilização didática da história da ciência. In: M. Pietrocola (Org.), *Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia em uma concepção integradora* (pp.151-170). Florianópolis: Editora da UFSC.
- Passos, J. C. (2009, julho/setembro). Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, 31(3), 1-8.
- Papp, D. (1945). *História de la física*. Buenos Aires: Espasa-Calpe.
- Quadros, S. (1996). *A termodinâmica e a invenção das máquinas térmicas*. São Paulo: Editora Scipione.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2012). *Princípios de física, 2*. Stamford: Cengage Learning.
- Silva, C. C., & Martins, R. A. (2003, março). A teoria das cores de Newton: um exemplo do uso da história da ciência em sala de aula. *Ciência & Educação*, Bauru, 9(1), 53-65.
- Styer, F. D. (2000, dezembro). Insight into entropy. *American Journal of Physics*, Melville, 68(12), 1090-1096.
- Schurmann, P. F. (1945). *História de la física*. Buenos Aires: Editora Nova.
- Tipler, P. A. (2009). *Física, 2*. Rio de Janeiro: LTC.
- Thomson, W. (1849). An account of Carnot' theory of the motive power of heat; with numerical results deduced from regnault's experiments on steam. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* (16), 571-574.
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2008). *Física, termodinâmica e ondas*. São Paulo: Editora Pearson, Addison Wesley.